doi:10.13866/j.azr.2019.01.02

咸海的过去、现在与未来[①]

阿布都米吉提·阿布力克木[1,2,3]， 葛拥晓[1,4]， 王亚俊[1]， 胡汝骥[1]
（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆大学,新疆 乌鲁木齐 830046；
3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 中国科学院中亚生态与环境研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要: 咸海曾经是世界第四大湖,如今缩小到原来面积的约 1/10。咸海究竟如何形成,又经历了怎样的演变过程及其形成机制等,一直是人们关注的问题。咸海水系(阿姆河和锡尔河流域)是青藏高原的隆升,新特提斯海的退却以及新生代全球气候变冷与海平面下降等区域和全球要素共同作用下,构成的一个完整的以青藏高原为中心的亚洲水塔体系的主要组成部分。咸海水系,从形成至大约 20 世纪中叶,湖泊面积与水文格局大致保持一个相对稳定的状态,只是 20 世纪下半叶以来,经历了大规模掠夺式的水资源开发和利用,造成了咸海危机。

关键词: 咸海；形成过程；演化机制；危机；青藏高原；亚洲中部干旱区

位于欧亚大陆腹地的咸海是青藏高原——亚洲水塔体系在亚洲中部干旱地区的一个内陆咸水湖[1]。它曾经是世界第四大湖,因为远离世界各大海洋,其水资源以积雪和冰川融水补给为主,水文系统脆弱,如今面积缩小到原来的约 10%。咸海流域干旱、半干旱气候条件决定了流域内居民的经济活动不论是游牧生活,还是定居发展都与水资源密切相关。咸海究竟如何形成,又经历了怎样的演变过程以及其形成演化的机制等,一直是人们关注的焦点。

1 研究区概况

1.1 咸海

咸海位于乌兹别克斯坦卡拉卡尔帕克斯坦共和国与哈萨克斯坦克孜洛尔达州及阿克托别州的交界处,水源主要来自青藏高原(帕米尔高原)西南坡的阿姆河及西坡的锡尔河,前者发源于帕米尔高原,后者发源于天山西部;咸海是两条河流的尾闾湖。咸海(哈萨克语:Арал теңізі,乌兹别克语:Orol dengizi, Орол денгизи,俄语:Ара́льское море,英语:Aral sea),旧译“阿拉海”,突厥语字面意为“岛屿之海”(在突厥语族中,Aral 意为“岛或岛屿”),因当时湖内有 1 000 多个岛屿而得此名。20 世纪 60 年代主要岛屿有:科卡拉尔(Kokaral,“蓝岛”之意)、巴尔萨克尔梅斯岛(Barsa Kilmas,“有去无回”之意)和复活岛(Vozrozhdeniya Island/Rebirth Island,以前叫尼古拉一世岛)。主要湖岸城镇有东北部的阿拉尔(Aral)和南边的穆伊纳克(Muynak)(图 1)。

咸海地处图兰低地。东岸北部是锡尔河三角洲,其余部分为克孜勒库姆(Kyzyl-Kum)沙漠;南岸为阿姆河三角洲,西岸为于斯蒂尔特(Ustyurt)台地,北岸为博尔苏基沙漠及一些低山丘陵(图 1)。如今咸海大部分水域消失,原湖底东部已被沙漠掩埋,称为“阿拉尔库姆”(Aral-Kum,即咸海沙漠)。

咸海北岸地势高低不均,湖岸线曲折,有许多大小湖湾及半岛。东岸和南岸地势比较平坦,近岸湖水较浅,湖岸土质多为沙土和松软黏土。东北岸有锡尔河入海口,东岸的其余部分湖岸线曲率极高,分布着数量众多的小岛、半岛及湖湾。南岸有阿姆河入海口。西岸比较陡峭,湖岸线形状变化不大。咸海湖岸线一带有海洋沉积层和大陆沉积层。

咸海的气候属典型的大陆型气候。1—2 月平均气温,北部为 −12 ℃,南部为 −6 ℃;7 月,北部为 23.3 ℃,南部为 26.1 ℃。7 月水温在 23 ~ 25 ℃;11—12 月水温 −0.7 ℃,湖面结冰。年降水量 100 mm 以下。20 世纪 60 年代以前,湖水的蒸发量与流入量大致相当[2-6]。

① 收稿日期:2018-11-07； 修订日期:2018-11-26
基金项目:中国科学院“西部之光”人才培养引进计划(2017-XBQNXZ-B-012);国家自然科学基金项目(41501115);天山青年计划项目(QN2016BS0052)资助
作者简介:阿布都米吉提·阿布力克木(1979-),男,博士研究生,主要从事环境遥感研究. E-mail:abdimijit@ms.xjb.ac.cn
通讯作者:葛拥晓. E-mail:geyx@ms.xjb.ac.cn

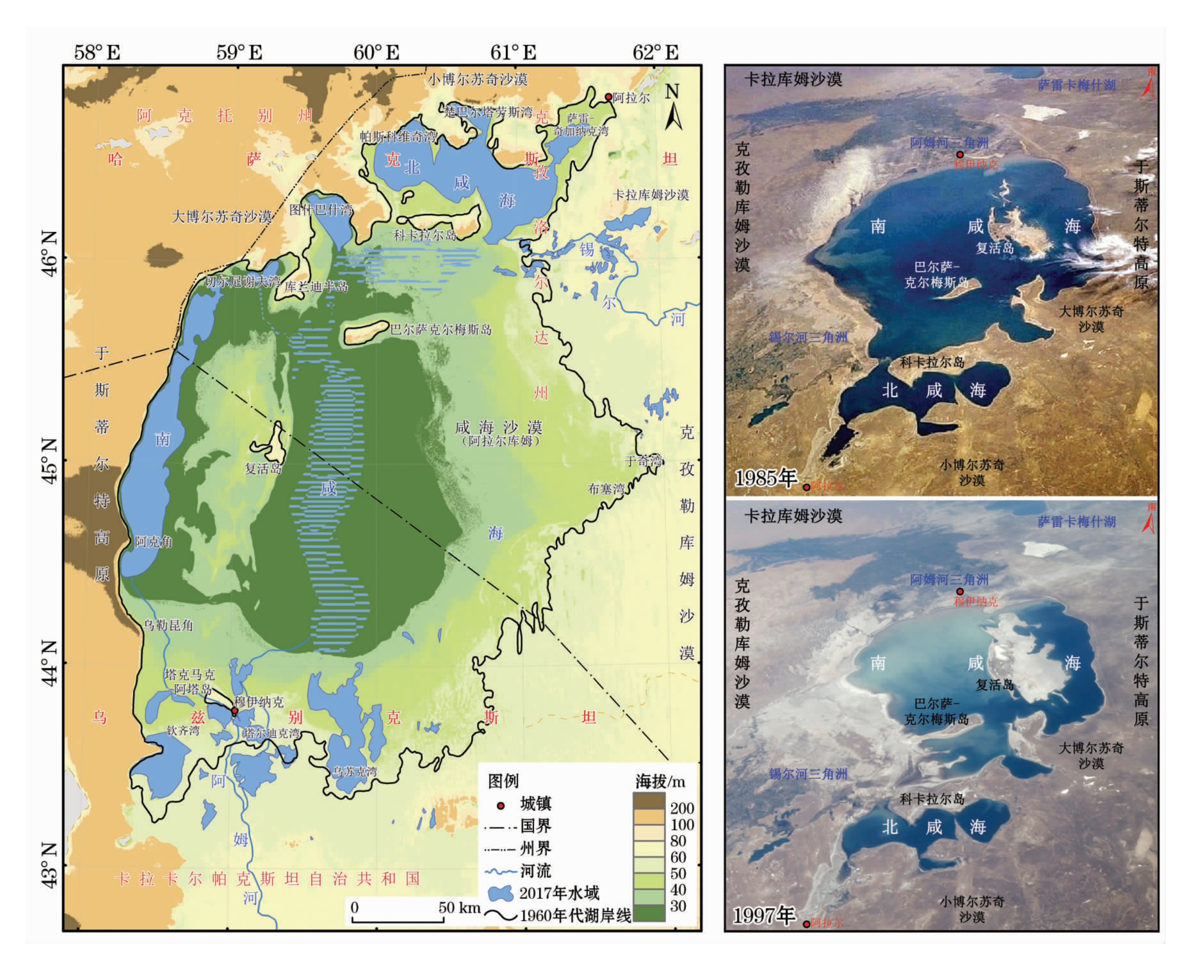


图 1　咸海地势以及由北向南鸟瞰图

Fig. 1　Topology and bird's eye view of the Aral Sea

20 世纪 60 年代,咸海湖泊水域面积达 68 000 km^2 以上,湖面平均海拔高度 53 m,南北最长 435 km,东西宽 290 km,平均深度 16 m,西岸最深处达 69 m,湖水总量约 10 830 $\times 10^8$ m^3,年入湖水量 630 $\times 10^8$ m^3,湖水矿化度为 9.9‰[2]。如今,湖泊面积缩小至 7 000 km^2 左右,西咸海湖面海拔降至 26 m(北咸海则保持 40 m 以上),湖水总量降至250 $\times 10^8$ m^3 左右[7]。

1.2　咸海流域概况

咸海流域展现于欧亚大陆中部,青藏高原以西。流域西边与于斯蒂尔特高原接壤,西南方为伊朗高原,南边有兴都库什山脉,东南部为萨里库勒岭以西的帕米尔高原,东部为喀克沙尔山以西的山地及天山西部,东北部是哈萨克丘陵,北部有图尔盖洼地和图尔盖高原,总面积约 1.76 $\times 10^4$ km^2,涉及中亚五国以及阿富汗和伊朗(图 2)[4-6]。

当今咸海流域不仅包括入湖的两条大河——阿姆河和锡尔河,通过卡拉库姆运河的连接,还包括穆尔加布河及捷詹河。有时,捷尔斯凯阿拉套—吉尔吉斯阿拉套—塔拉斯阿拉套—卡拉套线以北的河流,历史上属于锡尔河的支流,如楚河、塔拉斯河及萨雷苏河流域不计入咸海流域范围(图 3)。

咸海流域可以分为图兰低地(包括克孜勒库姆沙漠和卡拉库姆沙漠)、天山西南部、帕米尔高原及阿富汗北部山地等地理单元,其中帕米尔高原及天山西部为主要产流区。流域的地形整体东高西低,地貌形态变化多样,东部和东南部为天山和帕米尔高原的高山、峡谷和丘陵区,西部和西北部为图兰低地,以沙漠、草原和绿洲为主,其中卡拉库姆沙漠(3.50 $\times 10^5$ km^2)和克孜勒库姆沙漠(3.00 $\times 10^5$ km^2)占据了图兰低地大部分面积[1,5-6]。

咸海流域地处内陆深处,远离各大洋,气候为典型的大陆性气候,气候干燥,年平均降雨量不足 300 mm,而咸海附近和沙漠区年平均降雨量不足 100 mm。流域处于西风带,但是受地形影响,风向有所改变。东边离太平洋太远,况且隔着天山、帕米尔高原甚至青藏高原阻挡季风。南部为兴都库什山和伊朗高原,阻隔了印度洋的暖湿气流。相对来说,西边

于斯蒂尔特高原平均海拔 150 m,其西南部最高处仅为 365 m,不足以阻挡西风带的暖湿气流,暴雨极值区为费尔干纳盆地的西南坡,年降雨量超过 2 000 mm。虽然北边的图尔盖高地和哈萨克丘陵不是很高,但是从西伯利亚来的气流多为寒流,有效的降雨较少[1,8]。

咸海流域土地资源分布不均匀,耕地主要分布于河谷、三角洲和沿河地带。费尔干纳谷地,沿着锡尔河连续分布于塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和哈萨克斯坦境内的塔什干—希姆肯特—饥饿荒原灌区以及位于阿姆河下游包括花剌子模州、卡拉卡尔帕克斯坦共和国及达绍古孜州的花剌子模灌区为流域内 3 大灌区。除此之外,沿泽拉夫尚河的撒马尔罕—布哈拉灌区、沿卡什卡达里亚的卡尔希灌区、沿锡尔河的克孜洛尔达灌区和锡尔河三角洲、沿苏尔罕河的杜尚别—铁尔梅兹灌区、楚河及塔拉斯河灌区、沿穆尔加布河的马雷灌区、捷詹河灌区、瓦赫什河谷等地区也有较大规模的耕地分布(图 2)。

咸海流域中最重要的河流为阿姆河和锡尔河,另有一些河流因引水灌溉,已与两条大河流无地表水力联系,如塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦之间的泽拉夫尚河,吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦之间的楚河及塔拉斯河。还有一些河流直接流入人工水库或消失于沙漠中,如捷詹河、穆尔加布河、萨雷苏河等(图 3)[3]。

据统计,咸海流域多年平均径流量约 1 160 × 10^8 m^3[2]。整个流域自然径流主要形成于吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦,加上阿富汗和伊朗的产水,上游国家产水占绝大部分,除此之外,在乌兹别克境内形成一部分(表 1)[4,9]。

阿姆河是中亚最大、水量最多的河流,发源于阿富汗与克什米尔地区交界处兴都库什山脉北坡维略夫斯基冰川,上游两条支流喷赤河与瓦赫什河汇合后称为阿姆河,为阿富汗和塔吉克斯坦以及阿富汗和乌兹别克斯坦的界河,后流经阿富汗与土库曼斯坦两国边境,再转向西北进入土库曼斯坦境内,沿乌

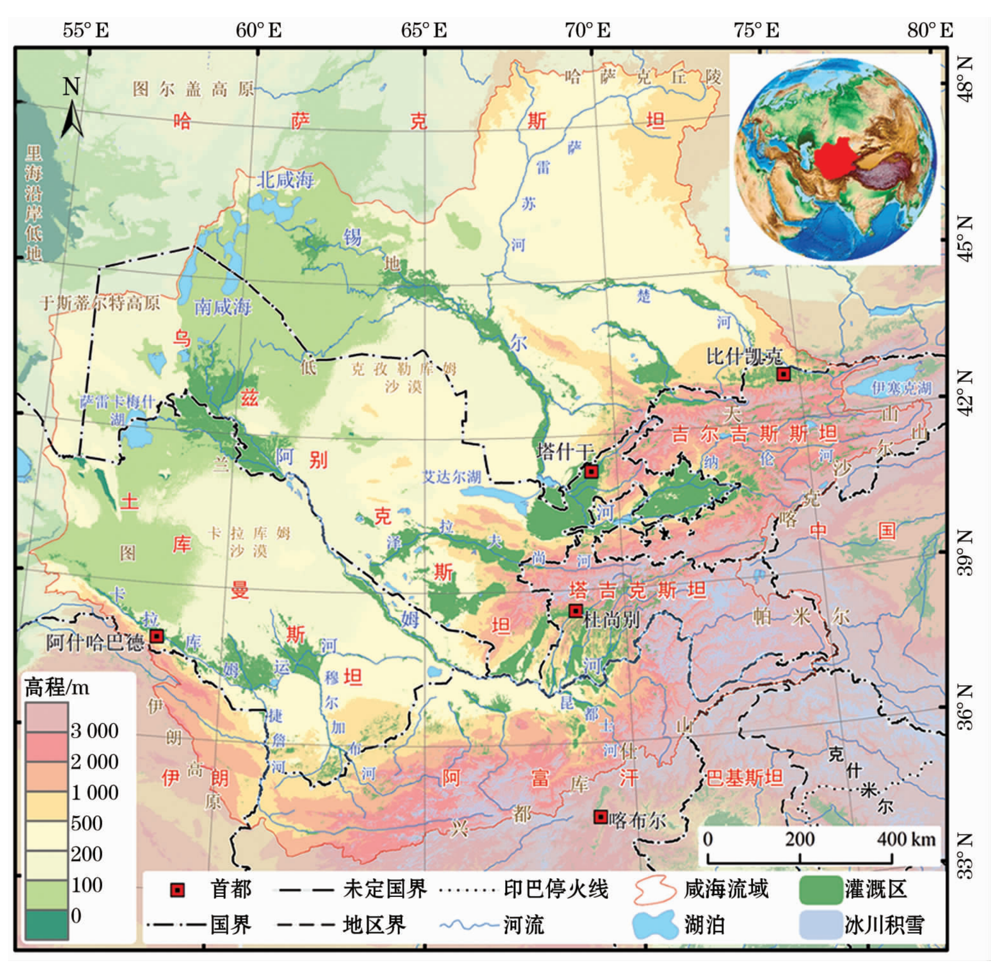


图 2　咸海流域地势

Fig. 2　Topology of Aral Sea Basin

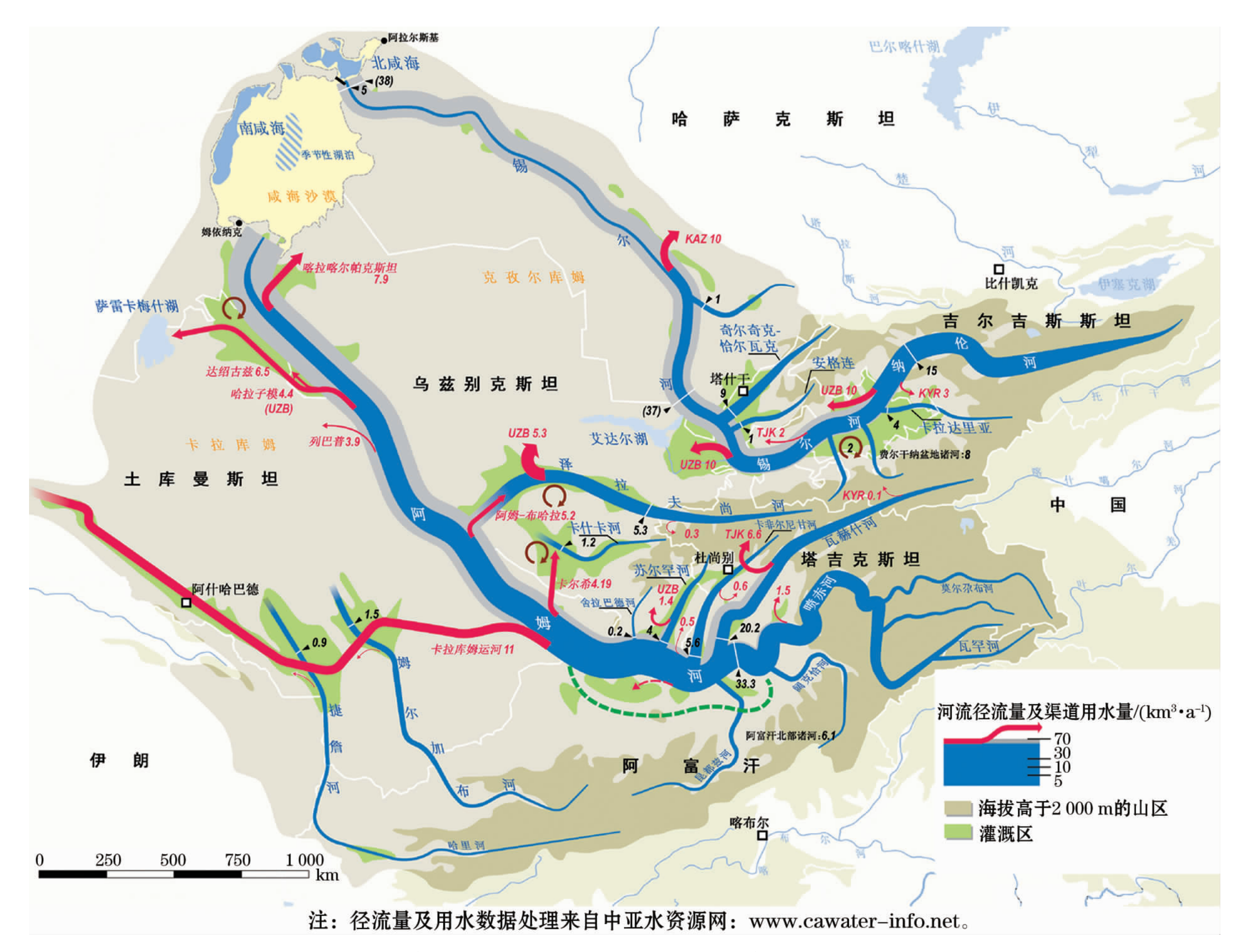


图 3　咸海流域水资源(Zoï Environment Network，佐伊环境网络 2010 年 10 月)

Fig. 3　Water resources in the Aral Sea basin (Zoï Environment Network, October, 2010)

表 1　咸海流域水资源状况

Tab. 1　Overview of water resources in the Aral Sea Basin

国 家	地表水资源 /(10⁸ m³ · a⁻¹)	地下水资源 /(10⁸ m³ · a⁻¹)	重复计算量 /(10⁸ m³ · a⁻¹)	水资源总量 /(10⁸ m³ · a⁻¹)	流域总量中所占比例/%
哈萨克斯坦*	25.16	18.46	6.22	37.40	2.90
吉尔吉斯斯坦*	291.96	8.62	1.92	298.66	23.10
塔吉克斯坦	597.37	66.60	44.50	619.37	48.00
土库曼斯坦	14.05	33.60	21.40	26.25	2.00
乌兹别克斯坦	123.53	184.55	106.59	201.49	15.60
阿富汗及伊朗	108.14	–	–	108.14	8.40
合 计	1 160.21	311.73	180.63	1 291.31	100.00

注:数据来源于 SCI-ICWC, 2000。* 数据来源于 SPECA 项目。

兹别克斯坦、土库曼斯坦两国交界地带蜿蜒穿行，最后于乌兹别克斯坦的穆伊纳克附近注入咸海[3,5-6]。

锡尔河发源于吉尔吉斯斯坦境内天山山区，上游的两条主要支流纳伦河与卡拉大里亚河在费尔干纳盆地汇合后称为锡尔河，后流经塔吉克斯坦和乌兹别克斯坦，最后在哈萨克斯坦境内从东北注入咸海[3,5-6]。

2　咸海的演变过程

2.1　地质时期的演变过程

咸海属于"海迹湖"，大约 1 200 万年前，黑海、里海和咸海都是副特提斯海的组成部分，副特提斯海还与地中海连接[10]，当时地壳下沉，地面水潴积而成，是海侵的遗迹。

大量的地质证据表明[11]，在距今700 ~ 500万

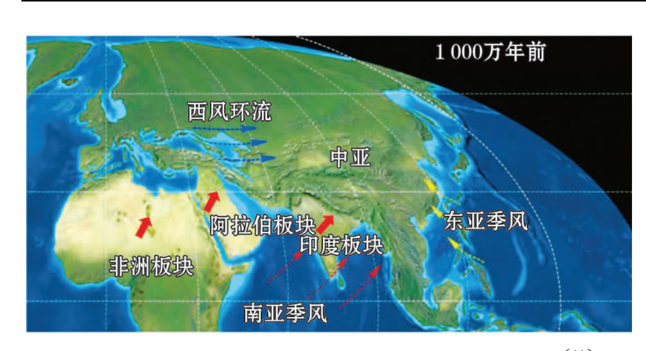


图 4　晚中新世(距今 1 000 万年前)的海陆格局[11]

Fig. 4　The land-sea pattern of the Late Miocene (10 million years ago)[11]

年的晚中新世以来,不仅印度板块与亚洲板块的碰撞持续进行,而且阿拉伯板块也在此期间与亚洲板块碰撞,导致伊朗高原的隆升。同时,非洲板块与欧亚板块汇聚,进一步加剧副特提斯海的退缩[12-13](图 4)。

在板块汇聚和全球变冷的共同作用下,帕米尔高原的前端(北帕米尔)与南天山相撞,帕米尔高原前缘断裂开始活动,关闭了进入塔里木盆地的水汽通道,加速了塔里木盆地极端干旱气候的形成[14-17]。这表明,青藏高原强烈的隆升构造活动已经基本结束,完整的青藏高原耸立在亚洲平原之上。与此同时,增强了青藏高原更加有效拦截西风环流水汽的能力,从而奠定了以青藏高原为中心的亚洲水塔体系——亚洲中部干旱地区阿姆河和锡尔河的发育和咸海水系的形成。

根据赵越先生[18-19]通过分析青藏高原的构造、地貌和环境,研究青藏高原河流水系形成年龄的观点、方法和结论。笔者认为,青藏高原西和西南坡的亚洲中部干旱区河流地貌的初始演化大约在 300 万年之前。从 250 ~ 1 万年(更新世)以后,中亚锡尔河和阿姆河的水流最终都注入咸海,构成了一个完整的咸海水系,此后这种格局基本保持不变。

2.2　中世纪的咸海

咸海流域农业灌溉历史悠久,花剌子模、费尔干纳、布哈拉、撒马尔罕等古代文明的形成与发展都与灌溉文化的发展紧密相连。当地居民 1 000 多年前就开挖了达尔格姆、纳尔帕伊、沙赫鲁德等渠道,从河道直接引水进行灌溉[3]。

咸海南边拥有历史悠久的农耕文化,近代为花剌子模(希瓦汗国),有比较多的文字记载;北边游牧民族无相关记录。除了文字记载外,18 世纪有些西方探险家绘制的地图中,咸海流域相关部分也被载入,如法国地理学家 Jean B. B. d'Anville 在 1734 年出版的中国及周围地区地图中(图略),可以看到咸海及咸海流域诸多河流。

古希腊及早期阿拉伯地理学家就有阿姆河流入里海的记载,证明直到 9 世纪阿姆河有条支流流入里海。而 10 世纪到 13 世纪期间,未发现阿姆河流入里海的相关记载,但是 1310—1575 年又出现了阿姆河流入里海的记载[20-21]。

成吉思汗西征时,在 1221 年通过毁掉大约 985 年修建的乌尔根奇大坝(Gurganj Dam),用河水淹没乌尔根奇古城[22-23],1221—1575 年,发生类似于 10 世纪以前的情况,具体情况如下:阿姆河在希瓦附近向西分出一条支流叫"乌兹博伊(Uzboy)"河。该河流入"萨雷卡梅什(Sary Kamish)"洼地形成淡水吞吐湖。从萨雷卡梅什湖往南流经大约 175 km 后,再向西流 290 km,穿越"巴拉伊深(Bala Ishem)"盐沼到达里海西南的土库曼巴什湾入里海[21]。在此期间可能导致咸海面积有所减少。

大约 1575 年,阿姆河东支穿越北边的沙丘流入咸海变成主流,此外,在原坝附近修建新坝,让乌兹博伊河彻底断水,导致萨雷卡梅什湖逐渐干涸[21]。当 1720 年俄罗斯探险家拜科维奇·柴卡斯基(Bekovich-Cherkasski)在这一带进行考察与测量时,阿姆河已经不再向里海输水[24]。

2.3　沙俄时期的咸海

1839—1889 年,沙俄完成对中亚各部落和汗国的征战。在此时期,俄罗斯帝国海军开始于 1847 年驻扎在咸海。最先部署的两艘双桅帆船,命名为"尼古拉号"和"米哈伊尔号",前者是一艘军舰,后者为渔业提供服务。1848 年,这两艘船调查了咸海的北部。同年,一艘更大的军舰"康斯坦丁号"下水,花 2 年时间完成了整个咸海的调查。在此基础上绘制出比较准确的咸海全图[25](图 5)。

图中显示的湖泊面积与 1957 年地图和 1964 年卫星影像上水域面积大致相当,近 7.00×10^4 km^2。图中记录了咸海内的 100 多个岛屿,其中面积大于 100 km^2 的有 4 个。

1848 年的图中(图略),阿姆河三角洲西部出现面积达 3 500 km^2 的水域(叫做"艾布基尔湖",可能是沼泽),阿姆河在 60°E、42°30′N 处分出一条分流往西汇入该水域。1867 年绘制的阿姆河三角洲地图中,该湖还存在。1875 年绘制的阿姆河三角洲地图中,艾布基尔湖已干涸。到了 20世纪 50—60年

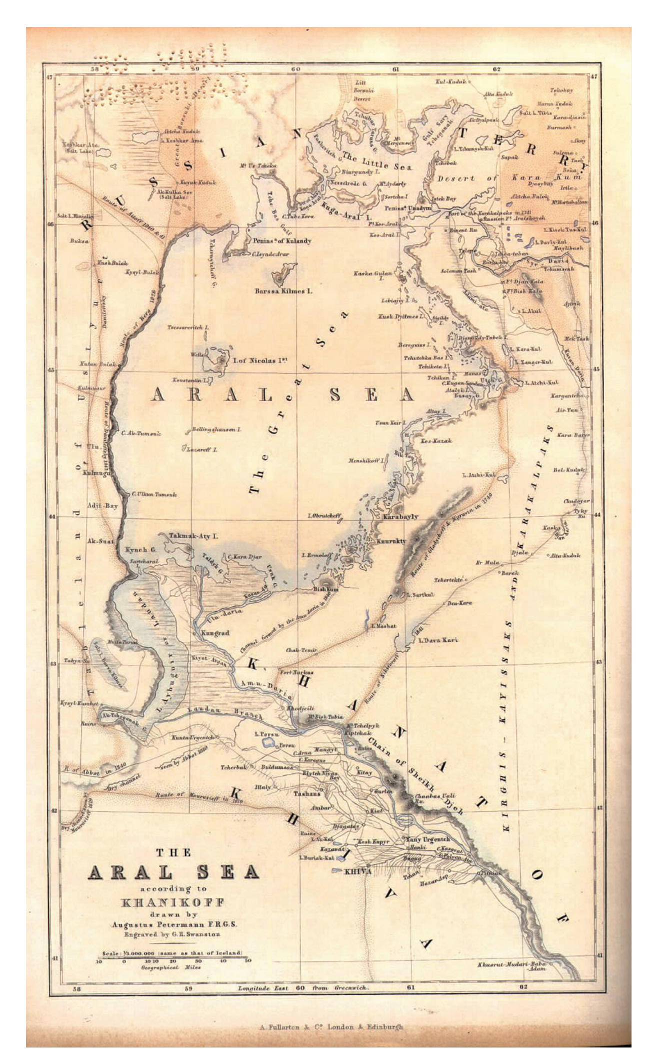


图 5　1856 年英国出版的咸海地图

Fig. 5　The map of the Aral Sea published in the United Kingdom in 1856

代消失，已不再与咸海连通，变成若干独立小湖和水库。

“十月革命”以前，咸海流域居民多以农牧业为主，主要为自然经济状态，人口很少，灌溉面积较小，咸海流域的灌溉现代化始于苏联时期。

2.4　苏联时期的咸海

苏联“第一个五年计划”期间，就开展了对咸海流域老灌溉系统的恢复和改造工程，修建水利枢纽，改善了撒马尔罕、费尔干纳河谷等的引水条件。直到二战前，完成了对锡尔河流域费尔干纳河谷及其他地区的水利工程，扩建和改造了大批渠道，扩大了流域灌溉面积并提高了灌溉保证率[3]。

对咸海流域的大规模开发始于 20 世纪 50 年代。1911—1960 年，咸海入湖流量约 560 × 10^8 m^3 · a^{-1}，平均水位保持在 53.3 m，湖泊面积 6.6 × 10^4 km^2，湖水总量约 1.00 × 10^{12} m^3。两条新运河（卡拉库姆运河及费尔干纳大运河）于 20 世纪 60 年代建成后，成千上万的移民来到阿姆河、锡尔河及新运河流域，开垦和灌溉了 6.60 × 10^6 hm^2 的水田和棉田，使该流域成为新的粮棉生产基地。卡拉库姆列宁运河是最主要的调水工程，可灌溉 3.50 × 10^6 hm^2 的荒漠草场和 1.00 × 10^6 hm^2 的新垦农区，改善 7.00 × 10^6 hm^2 草场的供水条件。以新建运河为代表的调水工程建成后，该地区棉花丰收，水稻高产，农业出现连年跃进的局面，农作物年产量比调水工程兴建之前提高了 4 倍。

至 1980 年，前苏联棉花年产量达 9.96 × 10^6 t，占世界总产量的 20%，其中 95% 产于该地区。当时，全苏联 40% 的稻谷，25% 的蔬菜、瓜果，32% 的葡萄也产于该地区。农业生产的丰收促进了该地区经济的发展，人口也迅速增长，已由 20 世纪 20 年代前的 7.00 × 10^6 人猛增到 3.60 × 10^7 人以上。从 20 世纪 50 年代起，苏联在咸海流域地区进行了大规模的水利建设，先后规划和兴建了一大批控制性水利枢纽和跨流域调水工程。至苏联解体前，咸海流域兴建库容超过 1 000 × 10^4 m^3 的水库 80 多座，总库容达到 600 × 10^8 m^3，有效库容达到 440 × 10^8 m^3[3,26]。

通过对大自然的改造，获得了前所未有的巨大收获，但是代价也是巨大的。咸海是一个内陆湖泊，入湖水量的减少导致其萎缩，当锡尔河、阿姆河的入湖水量急剧下降的情况下，相应的咸海的水位也急剧下降（图 6）。据实际观测，1971—1975 年，锡尔河、阿姆河入湖水量分别为 53 × 10^8 m^3 · a^{-1}、212 × 10^8 m^3 · a^{-1}，而 1976—1980 年，下降为 10 × 10^8

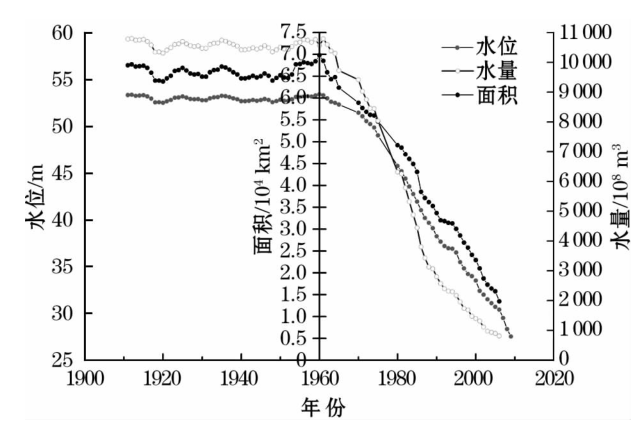


图 6　过去百年内咸海水位、水域及水量变化

Fig. 6　Changes in water level, surface area and water volume of Aral Sea from 1910 to 2010

表 2　锡尔河和阿姆河水资源在中亚各国间的分配

Tab. 2　Water distribution of Syr Darya and Amu Darya among the former soviet Central Asian Sates

加盟共和国	锡尔河		阿姆河*	
	议定书 No. 413 /(10^8 m^3·a^{-1})	用水比例/%	议定书 No. 566 /(10^8 m^3·a^{-1})	用水比例/%
哈萨克	141.7	38.1	–	–
吉尔吉斯	3.7	1.0	4	0.6
塔吉克	34.2	9.2	95	15.4
土库曼	–	–	220	35.8
乌兹别克	192.3	51.7	296	48.2
合计	317.9	100	615	100

注:* 假定阿富汗境内用水量为 21×10^8 m^3·a^{-1}时,苏联境内水量的分配。

m^3·a^{-1}、110×10^8 m^3·a^{-1}。1981—1990 年,锡尔河、阿姆河的入湖水量总计仅为 70×10^8 m^3·a^{-1}。当 1987 年水浇地发展到 7.30×10^6 hm^2 时,阿姆河和锡尔河已基本不能再为咸海输水,咸海水面下降 15 m,水域面积从 6.60×10^4 km^2 缩小到 3.70×10^4 km^2,南部和东部海岸线后退 150 km。咸海水面面积只剩下 2.52×10^4 km^2[2]。据统计,仅从 1970—1989 年,阿姆河和锡尔河流域的灌溉面积分别增加了 150% 和 130%,总灌溉面积近 1.00×10^7 hm^2[27]。

苏联解体前,苏联土壤改良和水利部水资源委员会根据各加盟共和国农业种植面积及其他经济社会用水需求,于 1984 年和 1987 年分别制定了锡尔河(No. 413)和阿姆河(No. 566)水量分配议定书,确定了各加盟共和国的用水量(表 2),由 1987 年成立的隶属于该委员会的两个流域水利联合体负责监督和执行上述协定[3,28-29]。

2.5　苏联解体后的咸海

苏联解体后,咸海流域的主要河流——阿姆河和锡尔河均成为跨界河流,中亚各国继承苏联庞大的水利设施,其中大部分已变成跨国水利系统,水资源分配问题成为新独立国家亟待解决的问题。但是各国刚独立不久,实施国家主权的愿望较强,因此,咸海危机的状况未得到改变。苏联时期,中央政府制定了由其主导的加盟共和国间水资源和能源资源相互补偿的机制,中亚各国独立后,由于缺乏超国家的协调机构,流域国家之间关于跨界水资源利用的矛盾和争端开始凸显,已成为影响中亚地区稳定的最重要因素之一[3]。

苏联解体时,锡尔河流域已建水库总库容达到 333×10^8 m^3,有效库容达到 270×10^8 m^3(占全流域多年平均水资源总量的 72.6%),其中位于上游吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦两国的托克托古尔水库、卡拉库姆水库兴利库容分别达到 140×10^8 m^3 和 25.5×10^8 m^3,可实现对流域水资源的多年调节。相比较而言,阿姆河流域上游支流瓦赫什河上的努列克水库具有较大调节库容(总库容 105×10^8 m^3,有效库容 45×10^8 m^3),包括喷赤河干流等上游主要支流均未建设大型调蓄工程[3]。

有关咸海流域跨界水资源合作的法律文件可以分为四类:总体合作框架性条约(7 项)、跨界水管理组织机构法规(7 项)和两河合作的实体条约(锡尔河 12 个,阿姆河 5 个)。后来提出的方案,由于流域各国缺乏合作意愿,磋商过程断断续续,至今未能达成各方均能接受的协议[3]。因此,咸海退缩加速的趋势没有被有效制止。

3　咸海的悲剧及其原因

3.1　20 世纪 60 年代至今咸海的变化

20 世纪 50 年代以后,从咸海水位、水域和水量变化(图 7),以及相应的遥感影像中可以发现,各岛屿与湖岸的相连(图 8)、南北咸海的分离、南咸海分为东西咸海等比较明显的变化及其发生时间。

20 世纪后半叶咸海变化大致如下:从 1960—1970 年,咸海的水位以每年 20 cm 的速度下降。在此期间,大小咸海间的科卡拉尔岛与西北岸相连成为一个半岛,阿姆河入湖口西边的塔克玛克阿塔岛与南岸相连;从 1970—1980 年,下降的速度达到每年 50~60 cm;1980 年,水位的下降速度达到每年 80~90 cm。与此同时,其含盐量从 10 g·L^{-1} 上升至 45 g·L^{-1};1987 年,科卡拉尔半岛与东岸连接,把咸海分成南、北两部分,称为南咸海和北咸海。其后,曾经试图通过人工渠道将两个湖泊重新连接,但最终因其继续萎缩,在 1999 年再度分开;1997 年,巴尔萨克尔梅斯岛与东北岸连接变成半岛(图 9)。

21 世纪咸海变化大致如下:2001 年,由于咸海的日渐枯竭,咸海中的沃兹罗日杰尼耶岛(复活岛)与南岸相连成为一个半岛;2003 年,沃兹罗日杰尼耶半岛北岸与南海北岸间剩下窄小的水道,使南咸海进一步分成了东、西两部分;2004 年,咸海 4 个湖泊,即东咸海、北咸海、西咸海及图什巴什湾的水域总面积只剩下原本大咸海的 1/4,而且还在继续萎

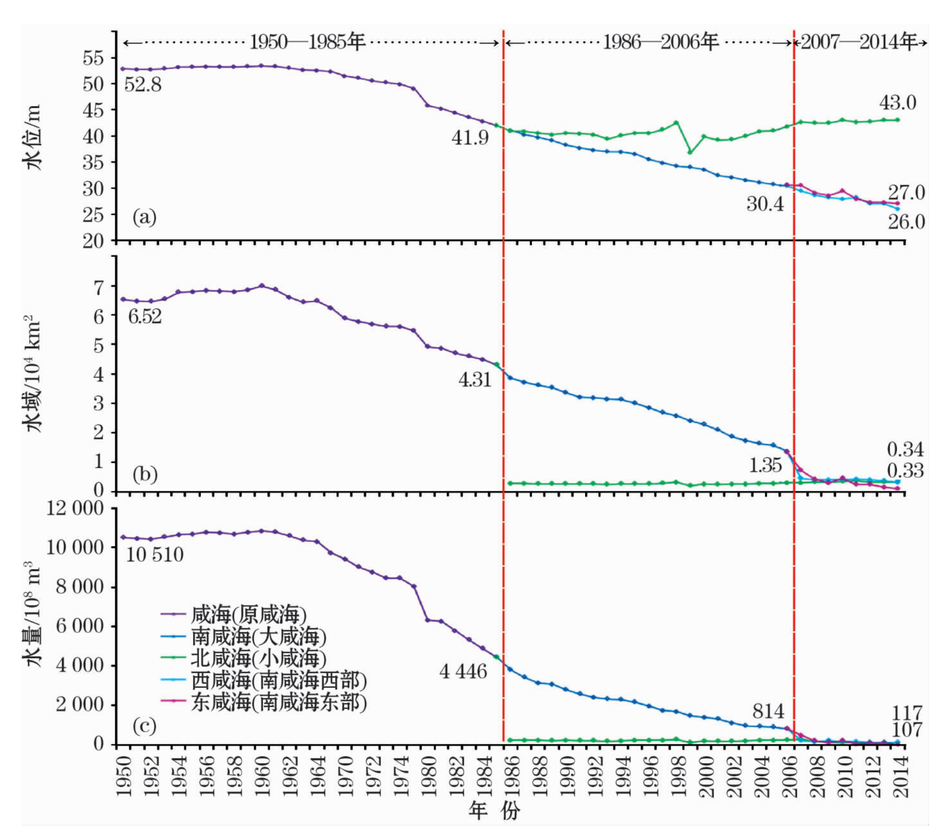


图 7 20 世纪 50 年代以来咸海水位、水域及水量变化

Fig. 7 Changes in water level, water area and water volume after the 1950s

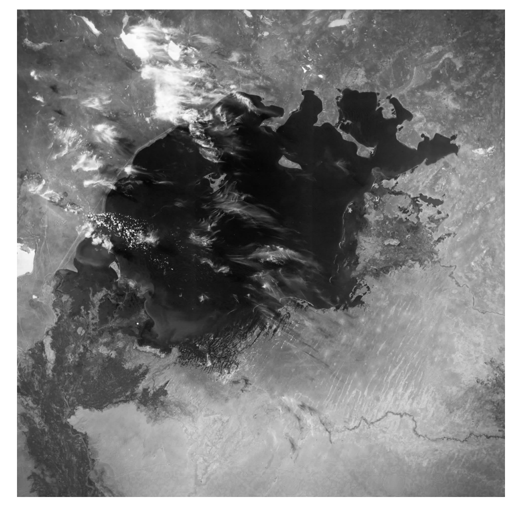


图 8 美国 CORONA 卫星影像图(1964 年 8 月 16 日)

Fig. 8 CORONA satellite image of the Aral Sea in 16 August 1964

缩;2005 年,为了拯救北咸海,哈萨克斯坦政府在南北咸海间修建了一座大坝(Dike Kok-Aral),使锡尔河的地表水不再自由流入南咸海;2007 年,咸海面积只有最初面积的 10%,南咸海的含盐量上升至 100 g·L^{-1};2009 年 9 月,东咸海干涸一度几乎无任何地表水,西咸海继续萎缩[30];2010 年,东咸海重新开始形成水域,西咸海继续萎缩;2014 年,东咸海再次干涸,西咸海继续缩小,咸海总面积减小至近代历史最小;2015 年,东咸海重新开始形成季节性水域,这种趋势保持至今;西咸海继续缩小(图 10)。

3.2 导致咸海悲剧的原因

由于全球变暖导致的区域性气候变化:流域山区的积雪线上移,冰川积雪面积缩小,河流的径流量急剧降低,使得咸海水面下降。此外,不仅随着气温的升高蒸发力增强,加快咸海干涸趋势。而且,由于气温升高后蒸发力的增强,使土壤水分减少,从而进一步增加沙尘暴和盐尘暴,加剧咸海危机。

咸海周围地区区域性气候也随着咸海干旱发生着剧烈变化。咸海水量减少,对当地气候的调节作用也变弱,周边地区冬天的气温越来越低,夏天的气温则越来越高。沙尘暴和多年来流入河流的农用化学物质使周边居民区受到了严重的污染,生态环境越来越差[5-6,31]。另一方面,由于流域上游山区发生地震、山体滑坡、泥石流等原因,在上游山区新形成若干堰塞湖(如萨雷兹湖)。中、上游地区的湖泊面积增加,也在一定程度上加快作为尾闾湖——咸海的退缩。但是,这种影响微乎其微,远不及人类活动对咸海自然变化过程的干预。

咸海消失不仅仅是气候变化的结果,更多的是

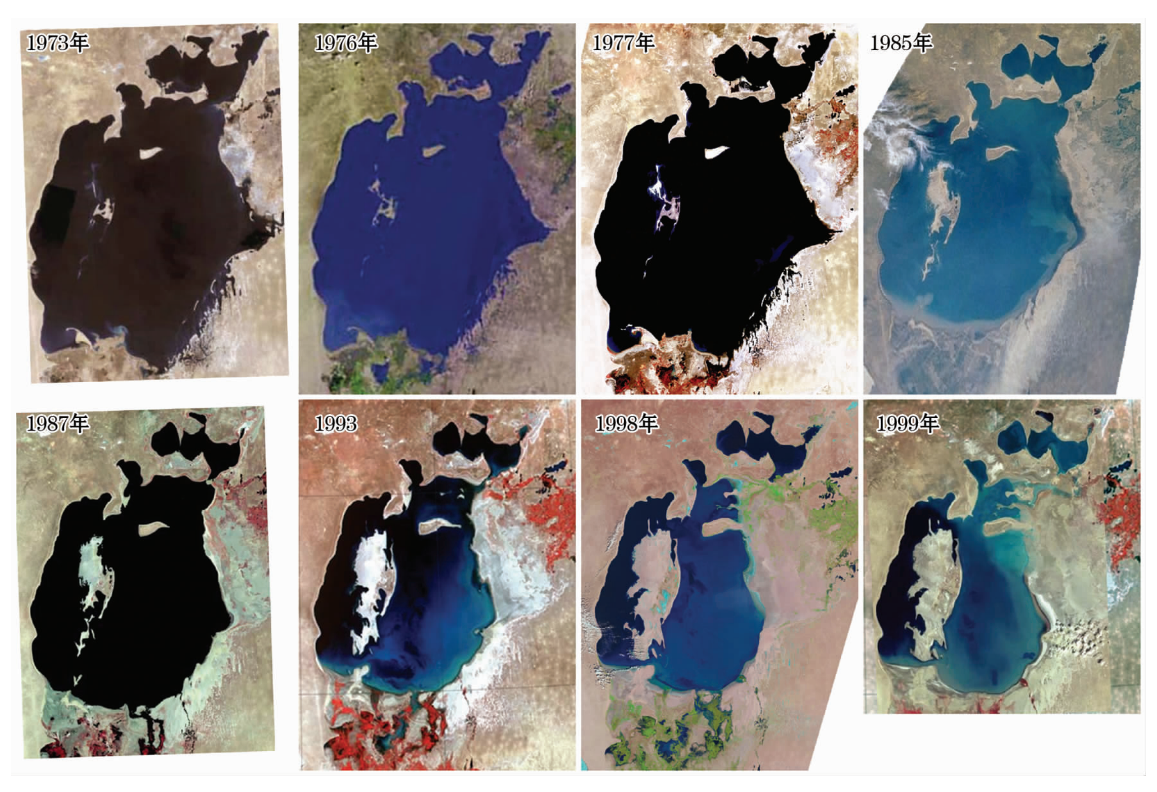


图 9　20 世纪末咸海变化过程(据美国国家宇航局 Landsat 卫星拍摄的一系列卫星影像)

Fig. 9　Changes in the Aral Sea at the end of the 20th century (A series of satellite images taken by NASA's Landsat satellite)

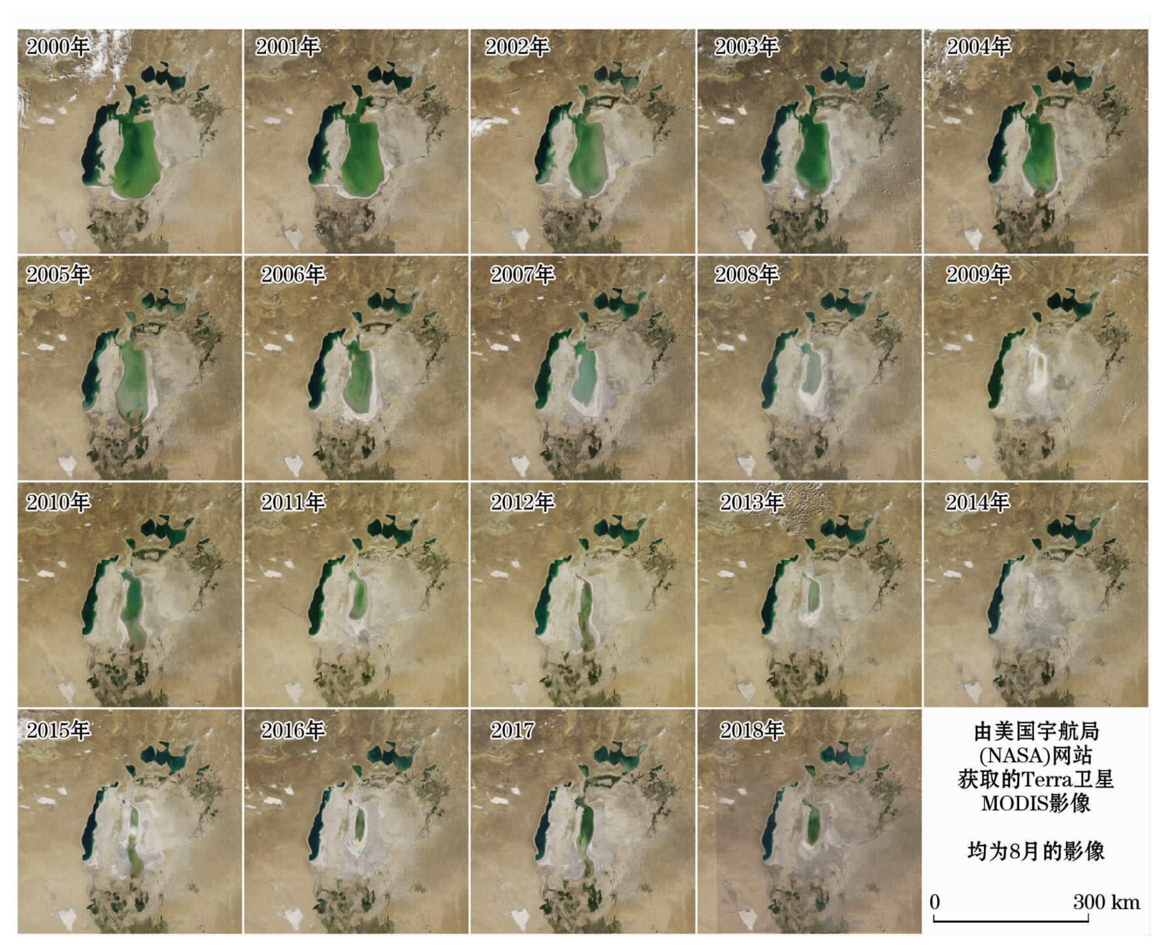


图 10　21 世纪初咸海变化过程

Fig. 10　Changes of the Aral Sea at the beginning of the 21st century

人类活动对其产生的影响。据联合国环境规划署的一份报告，目前有 6.00×10^7 以上的人口居住在咸海流域，人口数量比 20 世纪 60 年代翻了 4 倍。为了满足日益增长的人类生产生活的需求，前苏联在咸海流域大量兴建跨加盟共和国的大型水利工程，在原绿洲边缘地区大量开垦，改变了各大河流的水文关系。

从锡尔河取水的引水渠多数分布于费尔干纳盆地和塔什干—希姆肯特灌区，主要引水渠（运河）有：费尔干纳大运河（BFC）、费尔干纳北运河（NFC）、费尔干纳南运河（SFC）、纳曼干运河（BNC）、安集延运河（BAC）等。大型水库有托克托古尔水库、安集延水库、凯拉库姆水库、恰尔瓦克水库、恰尔达拉水库等。

在阿姆河流域，20 世纪中叶，前苏联开始大量移民到卡拉库姆运河流域，开垦荒地 6.60×10^6 hm^2，种植耗水作物棉花和水稻，仅一条运河就将注入咸海的阿姆河流河水截取了 1/3，整个灌溉网络将阿姆河径流量取走了 80% 以上，使注入咸海水量锐减[2]。

卡拉库姆运河是一条由阿姆河取水向卡拉库姆沙漠的灌溉供水工程，全长 1 375 km，平均输水量 130×10^8 $m^3\cdot a^{-1}$，1954 年开工，1988 年落成。由东向西穿越土库曼斯坦南部，使得土库曼斯坦境内的穆尔加布河及捷詹河灌区通过该运河与阿姆河有了水文关系。但是效率低下，约 50% 水耗尽在沿途。

除了卡拉库姆运河外，卡尔什运河、阿姆—布哈拉运河以及从图雅姆雍水利枢纽取水的几条引水渠也比较大。阿姆河流域大型水库不多，只有上游瓦赫什河的努列克及下游庞大的图雅姆雍水利枢纽。

咸海悲剧发生的诸多原因中，兴建大型水利灌溉工程占主导地位，除了开挖引水渠/运河、建立大型水库以外，大型人工湖的形成也有不小的影响。在锡尔河流域，形成艾达尔湖泊群，其总面积为3 478 km^2，水量为 443×10^8 m^3，平均水深为 12.5 m，最深处为 33.6 m；在阿姆河流域，向萨雷卡梅什洼地注水重现萨雷卡梅什湖，其面积约 5 000 km^2，水量为 685.6×10^8 m^3，平均水深为 8 m，最深处为 40 m[6]。

2014 年 10 月 28—29 日在乌兹别克斯坦花剌子模首府乌尔根齐市举行的“缓解咸海地区生态危机国际合作会议”上卡里莫夫总统讲到：“最近 50 年来，阿姆河和锡尔河注入咸海的总径流量几乎减少到原来的 1/5，咸海的水体容积还不足原来的 1/14，而水体的含盐度却提高了 24 倍，几乎导致繁殖于咸海水域的鱼类和水生生物群体全部消失，12 种哺乳动物，26 种鸟类和 11 种植物已濒临灭绝。”[7]

更为严重的是咸海萎缩，留下 5.50×10^6 hm^2 荒漠，成为盐碱尘暴的策源地，沙尘暴每年将产生上亿吨沙尘和有毒盐类物质。随沙尘和降雨每年落向地面的盐碱达 450～600 $kg\cdot hm^{-2}$，导致大量耕地出现盐碱化[5-6]。

4 咸海的未来

前苏联的一些专家甚至认为，自然情况下咸海的消亡不可避免。与其把它放在那里任凭太阳把水蒸发掉，不如动手利用这些水。看到咸海缩小的负面影响之后，还曾想过用“拆东墙补西墙”的方式来拯救咸海，修建巨大的引水渠把西伯利亚河流的水引到咸海，结果这个工程太过浩大，最终不了了之。

为了保护咸海，中亚各国成立了委员会，对各国的利益诉求进行协调。联合国及有关国际组织也成立了基金会，展开专项行动来保护咸海，并为周边地区居民打深水井以解决饮水问题[3,9]。

2003 年，北咸海分为东、西两边。同年 10 月，相对富裕的哈萨克斯坦宣布耗资 2.6×10^8 美元的拯救计划，建造一个人工堤坝将南北两湖完全分离，并于 2005 年 8 月竣工。加上重修锡尔河相关水渠，减少水流的浪费等措施，使得北咸海的海域面积由 2003 年的 2 550 km^2 增加到 2008 年的 3 300 km^2，增加了 30%，而海水深度也从原来的 30 m 增加到 42 m[32]。另外，由于湖泊增大，使多年不见的积雨云又回到这个地区，使该区降雨量亦慢慢恢复，这种变化甚至可能给当地农业的复苏带来一线希望。此外，在干枯的湖床种植当地的灌木种梭梭，增加植被覆盖度，预计将会加速自然恢复的速度，吸引其他植物和动物。

另一方面，南咸海由于乌兹别克政府财政相对紧缩，无力采取大规模有效措施来减缓南咸海水位仍在不断下降的趋势。2014 年，南咸海东部 600 年来首次干涸。尽管如此，乌兹别克斯坦政府仍决定定期打开河流上的闸门，让一部分水流进南咸海。

导致咸海不断萎缩的原因不是锡尔河和阿姆河流域水资源短缺，而是粗放式的农业开发和由此而带来的落后灌溉模式造成两河径流量的无谓流失。全力推动中亚水资源的大规模现代化科学管理是必

由之路。建立咸海流域统一的水资源监测与管理信息平台,彻底改革中亚落后的灌溉模式,采用高效节水(精准灌溉)模式,促使无谓消耗在大水漫灌、渠道渗漏和大田蒸发上的农业用水重新“聚集”起来,让其归流咸海,才是遏制咸海萎缩的务实途径[33]。

(1)减少农业灌溉用水量。通过提高灌溉网络的传输效率(如引水渠做好防渗措施,在经济条件允许的情况下可以采用铺设地下输水管道等措施,减少传输损失)和采用滴灌、喷灌等节水灌溉技术提高灌溉效率[34]。除此之外,通过调整农作物结构,减少耗水量大的农作物面积,增加耗水量少的农作物面积,增加耐盐性作物面积等方法减少灌溉引水量。

(2)提高回归水利用率。对各排水渠的水质进行监测,根据监测结果有效利用回归水,尽量减少从河道引水灌溉的水资源量。

(3)建立全流域统一的流域云数据水资源监测与管理信息平台。通过国际水资源协调组织,严格按照各国家各地州的实际需水量来分配水资源,解决不合理的用水问题。对于水资源不合理利用导致的土壤盐渍化问题,在地下水水质满足灌溉的条件下,采取地表水和地下水灌溉相结合的方法避免地下水位持续上升。对于地下水位高,且水质差的地区,采取垂直排水的方法进行排水,降低地下水位,尽量减少地下水蒸发及盐分在地表积聚。另外,可以引进耐盐性较强的农作物改善土质。

(4)建立咸海国际援助基金,按照绿色和可持续管理的原则,统一协调建设引水、排水工程,使咸海每年增加 150×10^8 m^3 水量入海。

(5)在咸海干涸河床实施生态修复工程,将盐尘释放最严重的 1.00×10^4 km^2 裸露盐床利用生物方法进行治理,减少盐尘释放,防止盐尘长时间、远距离传输。

参考文献(References):

〔1〕 陈曦,姜逢清,王亚俊,等.亚洲中部干旱区生态地理格局研究〔J〕.干旱区研究,2013,30(3):385－390.〔Chen Xi,Jiang Fengqing,Wang Yajun,et al. Characteristics of the eco-geographical pattern in arid land of Central Asia〔J〕. Arid Zone Research,2013,30(3):385－390.〕

〔2〕 加帕尔·买合皮尔,图尔苏诺夫 AA.亚洲中部湖泊水生态学概论〔M〕.乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1996.〔Jappar Mahpir,Tursunov A A. An Introduction to the Hydro-ecology in the Central Asia〔M〕. Urumqi:Xinjiang Science,Technology and Health Press(K),1996.〕

〔3〕 田向荣,王国义,樊彦芳.咸海流域跨界水合作历史,形势及思考〔J〕.边界与海洋研究,2017,6(2):90－104.〔Tian Xiangrong,Wang Guoyi,Fan Yanfang. Aral Sea Basin transboundary water cooperation:Histiry,present situation and reflections〔J〕. Journal of Boundary and Ocean Studies,2017,6(2):90－104.〕

〔4〕 李均力,包安明,陈曦,等.气候变化背景下的中亚资源与环境〔M〕.北京:气象出版社,2017.〔Li Junli,Bao Anming,Chen Xi,et al. The Impact of Climate Change on Natural Resources and Environment in Central Asia〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,2017.〕

〔5〕 吉力力·阿不都外力,马龙.中亚环境概论〔M〕.北京:气象出版社,2015.〔Jilili Abuduwaili,Ma Long. Overview of Central Asian Environments〔M〕. Beijing:China Meteorological Press,2015.〕

〔6〕 吉力力·阿不都外力.干旱区湖泊与盐尘暴〔M〕.北京:中国环境出版社,2012.〔Jilili Abuduwaili. Lakes of Arid Land and Salt-Dust Storms〔M〕. Beijing:China Environment Press,2012.〕

〔7〕 徐海燕.绿色丝绸之路经济带建设与中亚生态环境问题——以咸海治理和塔吉克斯坦为例〔J〕.俄罗斯东欧中亚研究,2016(5):97－107.〔Xu Haiyan. Green Silk Road economic belt construction and ecological environment problems in Central Asia〔J〕. Russian,East European & Central Asian Studies,2016(5):97－107.〕

〔8〕 胡增运,胡汝骥,周启鸣,等.亚洲中部干旱区干湿时空变化特征〔J〕.干旱区研究,2018,35(2):260－268.〔Hu Zengyun,Hu Ruji,Zhou Qiming,et al. Spatiotemporal variation of wetting or drying in the arid regions in Central Asia〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(2):260－268.〕

〔9〕 姚海娇,周宏飞.中亚五国咸海流域水资源策略的博弈分析〔J〕.干旱区地理,2013,36(4):764－771.〔Yao Haijiao,Zhou Hongfei. Game analysis of water resources strategy among the Central Asia Countries around the Aral Sea Basin〔J〕. Arid Land Geography,2013,36(4):764－771.〕

〔10〕 Bosboom R,Mandic O,Dupont-Nivet G,et al. Late Eocene palaeogeography of the proto-Paratethys Sea in Central Asia(NW China,Southern Kyrgyzstan and SW Tajikistan)〔J〕. Geological Society,London,Special Publications,2017,427(1):565－588.

〔11〕 孙继敏,刘卫国,柳中晖,等.青藏高原隆升与新特提斯海退却对亚洲中纬度阶段性气候干旱的影响〔J〕.中国科学院院刊,2017,32(9):951－958.〔Sun Jimin,Liu Weiguo,Liu Zhonghui,et al. Effects of the up lift of the Tibetan Plateau and retreat of Neotethys Ocean on the stepwise aridification of mid-latitude Asian interior〔J〕. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2017,32(9):951－958.〕

〔12〕 Gavillot Y,Axen G J,Stockli D F,et al. Timing of thrust activity in the High Zagros fold-thrust belt,Iran,from (U-Th)/He thermochronometry〔J〕. Tectonics,2010,29(4):253－274.

〔13〕 Mouthereau F,Lacombe O,Vergés J. Building the Zagros collisional orogen:Timing,strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence〔J〕. Tectonophysics,2012,532:27－60.

〔14〕 Cao K,Wang G C,van der Beek P,et al. Cenozoic thermo-tectonic evolution of the northeastern Pamir revealed by zircon and apatite fission-track thermochronology〔J〕. Tectonophysics,2013,589:17－32.

〔15〕 Fu B,Ninomiya Y,Guo J. Slip partitioning in the northeast Pamir-Tian Shan convergence zone〔J〕. Tectonophysics,2010,483(3－

4):344－364.
〔16〕 Sun J,Liu W,Liu Z,et al. Extreme aridification since the beginning of the Pliocene in the Tarim Basin,western China[J]. Palaeogeography,Palaeoclimatology,Palaeoecology,2017,485:189－200.
〔17〕 Thompson J A,Burbank D W,Li T,et al. Late Miocene northward propagation of the Northeast Pamir thrust system,Northwest China [J]. Tectonics,2015,34(3):510－534.
〔18〕 赵越,黎敦朋,刘健,等. 构造地貌——认识高原历史的钥匙[J]. 地质通报,2008,27(12):1 961－1 967.〔Zhao Yue,Li Dunming,Liu Jian,et al. Tectonic geomorphology:A key to understanding of the history of the plateau[J]. Geological Bulletin of China,2008,27(12):1 961－1 967.〕
〔19〕 刘锋,赵越,宋立才,等. 伊洛瓦底江上游水系形成时代研究——以滇西龙川江为例[J]. 中国地质,2015,42(1):199－206.〔Liu Feng,Zhao Yue,Song Licai,et al. Time of the upper Irrawaddy streams:A case study of the Longchuan River,Western Yunnan[J]. Geology in China,2015,42(1):199－206.〕
〔20〕 Létolle R,Micklin P,Aladin N,et al. Uzboy and the Aral regressions:A hydrological approach[J]. Quaternary International,2007,173:125－136.
〔21〕 Gloukhovskoy A I. The Passage of the Water of the Amu-Darya by its Old Bed into the Caspian Sea[M]. St Petersburgh,1893.
〔22〕 Volk S. The Course of the Oxus River[M]. Archived from the Original on 2009－12－23. Retrieved 2010－02－08,2000.
〔23〕 Sykes P. A History of Persia[M]. London:Macmillan and Company,1921.
〔24〕 Kozubov R Uzboy. Turkmenistan Analytic Magazine[M]. Retrieved,2010－02－08.
〔25〕 Valikhanov C C. The Russians in Central Asia:Their Occupation of the Kirghiz Steppe and the Line of the Syr-Daria:Their Political Relations with Khiva,Bokhara,and Kokan:Also Descriptions of Chinese Turkestan and Dzungaria[M]. Edward Stanford,1865.
〔26〕 Dukhovny V A,Sokolov V. Integrated water resources management in the Aral Sea Basin[M]. 3rd World Water Forum,Tashkent,Uzbekistan:SIC ICWC/IWMI and SDC,2005:6－7.
〔27〕 Bucknall J,Klytchnikova I,Lampietti J,et al. Irrigation in Central Asia:Social,Economic and Environmental Considerations[M]. Washington DC:World Bank,2003.
〔28〕 ENVSEC. Environment and Security in the Amu Darya Basin[J]. UNEP,2011:44.
〔29〕 Klemm W,Shobair S. The Afghan Part of Amu Darya Basin:Impact of Irrigation in Northern Afghanistan on Water Use in the Amu Darya Basin[R]. FAO:Rome,2010.
〔30〕 Micklin P. The past,present,and future Aral Sea[J]. Lakes & Reservoirs:Research & Management,2010,15(3):193－213.
〔31〕 Indoitu R,Kozhoridze G,Batyrbaeva M,et al. Dust emission and environmental changes in the dried bottom of the Aral Sea[J]. Aeolian Research,2015,17:101－115.
〔32〕 Micklin P. The future Aral Sea:Hope and despair[J]. Environmental Earth Sciences,2016,75(9):844.
〔33〕 陈曦,包安明,古丽·加帕尔,等. 塔里木河流域生态系统综合监测与评估[M]. 北京:科学出版社,2016.〔Chen Xi,Bao Anming,Guli Jiapaer,et al. Comprehensive Monitoring and Evaluation on Ecosystem in Tarim River Basin[M]. Beijing:Science Press,2016.〕
〔34〕 胡治强,侯振安,闵伟,等. 地下防渗对滴灌棉花产量和水分利用率的影响[J]. 干旱区研究,2018,35(4):779－788.〔Hu Zhiqiang,Hou Zhen'an,Min Wei,et al. Effects of subsurface impermeable film on cotton yield and water use efficiency in drip-irrigated cotton field[J]. Arid Zone Research,2018,35(4):779－788.〕

The Past,Present and Feature of the Aral Sea

Ablekim Abdimijit[1,2,3], GE Yong-xiao[1,4], WANG Ya-jun[1], HU Ru-ji[1]

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*,*Chinese Academy of Sciences Urumqi* 830011,*Xinjiang*,*China*; 2. *Xinjiang University*,*Urumqi* 830046,*Xinjiang*,*China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences*,*Beijing* 100049,*China*; 4. *CAS Research Center for Ecology and Environment of Central Asia*,*Urumqi* 830011,*Xinjiang*,*China*)

Abstract: The Aral Sea was once the 4th largest lake in the world and shrank to about 10% nowadays,because of far from the world's major oceans and the fragile hydrological system. Several questions are urgent to be answered,namely,how the Aral Sea formatted,what it has undergone,and what's the evolution mechanism,which have always been a concern of related scientists all around the world. The Aral Sea basin (the Amu Darya and the Syr Darya), a main component of the complete Asian water tower system centered on the Qinghai-Tibet Plateau,which came into being after uplift of the Qinghai-Tibet Plateau,the retreat of the Neo-Tethys Sea,and under the impact of regional and global factors such as the global climate cooling and sea level decline. The Aral Sea system has maintained a relatively stable level in water surface area and hydrology pattern from the formation to the middle of the last century. It has only experienced extensive exploitation and utilization of water resources,resulting in the shrinking surface water area,the increasing exposed dry lake bed and frequent salt dust storms in the context of climate change from the second half of the 20th century,which have caused the crisis in the Aral Sea basin.

Key words: Aral Sea; formation process; evolution mechanism; crises; Tibetan Plateau; arid Central Asia